



Criptosistemas de Chave Pública Baseados no Problema do Logaritmo Discreto

Prof. Dr. Iaçanã Ianiski Weber

Confiabilidade e Segurança de Software

98G08-4

Agradecimentos especiais ao Prof. Avelino Zorzo e aos Autores Christof Paar e Jan Pelzl pelo material.

Índice

- 1 Troca de Chaves de Diffie–Hellman
- 2 O Problema do Logaritmo Discreto
- 3 Segurança da Troca de Chaves Diffie-Hellman
- 4 Exercícios

- 1 Troca de Chaves de Diffie–Hellman
- 2 O Problema do Logaritmo Discreto
- 3 Segurança da Troca de Chaves Diffie–Hellman
- 4 Exercícios

Troca de Chaves Diffie-Hellman: Visão Geral

- Proposto em 1976 por Whitfield Diffie e Martin Hellman
- Amplamente utilizado, e.g., em Secure Shell (SSH), Transport Layer Security (TLS) e Internet Protocol Security (IPSec)
- O Diffie-Hellman Key Exchange (DHKE) é um protocolo de troca de chaves e **não** utilizado para criptografia
(Para fins de criptografia baseada no DHKE, o ElGamal pode ser utilizado.)

Troca de Chaves Diffie-Hellman: Configuração Inicial

- 1 Escolha um primo grande p .
- 2 Escolha um inteiro $\alpha \in \{2, 3, \dots, p-2\}$.
- 3 Publique p e α .

Troca de Chaves Diffie-Hellman: Protocolo

Alice

Bob

Escolhe key privada aleatória

$$k_{prA} = a \in \{1, 2, \dots, p-1\}$$

Escolhe key privada aleatória

$$k_{prB} = b \in \{1, 2, \dots, p-1\}$$

Calcula key pública correspondente

$$k_{pubA} = A = \alpha^a \bmod p$$

\xrightarrow{A}

\xleftarrow{B}

Calcula key pública correspondente

$$k_{pubB} = B = \alpha^b \bmod p$$

Calcula segredo comum

$$k_{AB} = B^a = (\alpha^b)^a \bmod p$$

Calcula segredo comum

$$k_{AB} = A^b = (\alpha^a)^b \bmod p$$

.....

Podemos agora usar a key conjunta k_{AB} para criptografia, e.g., com AES:

$$y = \text{AES}_{k_{AB}}(x)$$

\xrightarrow{y}

$$x = \text{AES}_{k_{AB}}^{-1}(y)$$

Troca de Chaves Diffie-Hellman: Exemplo

Parâmetros: $p = 29, \alpha = 2$

Alice

Escolhe key privada aleatória

$$k_{prA} = a = 5$$

Calcula key pública correspondente

$$k_{pubA} = A = 2^5 = 3 \bmod 29$$

Calcula segredo comum

$$k_{AB} = B^a = 7^5 = 16 \bmod 29$$

Bob

Escolhe key privada aleatória

$$k_{prB} = b = 12$$

Calcula key pública correspondente

$$k_{pubB} = B = 2^{12} = 7 \bmod 29$$

Calcula segredo comum

$$k_{AB} = A^b = 3^{12} = 16 \bmod 29$$

Prova de correção

Alice calcula: $B^a = (\alpha^b)^a \bmod p$

Bob calcula: $A^b = (\alpha^a)^b \bmod p$

Ou seja, Alice e Bob calculam a mesma key k_{AB} !

→³

←⁷

Índice

- 1 Troca de Chaves de Diffie–Hellman
- 2 O Problema do Logaritmo Discreto
- 3 Segurança da Troca de Chaves Diffie-Hellman
- 4 Exercícios

O Problema do Logaritmo Discreto

Problema do Logaritmo Discreto (*Discrete Logarithm Problem* - DLP) em \mathbb{Z}_p^* .

- Dado o grupo cíclico finito \mathbb{Z}_p^* de ordem $p - 1$, um elemento primitivo $\alpha \in \mathbb{Z}_p^*$ e outro elemento $\beta \in \mathbb{Z}_p^*$.
- O DLP é o problema de determinar o inteiro x tal que $1 \leq x \leq p - 1$ e $\alpha^x \equiv \beta \pmod{p}$.
- Esta computação é chamada de **problema do logaritmo discreto**.

$$x = \log_{\alpha} \beta \pmod{p}$$

- Exemplo: Calcule x para $5^x \equiv 41 \pmod{47}$.

O Problema do Logaritmo Discreto Generalizado

- Dado um grupo cíclico finito G com a operação de grupo \circ e cardinalidade n .
- Consideramos um elemento primitivo $\alpha \in G$ e outro elemento $\beta \in G$.
- O problema do logaritmo discreto consiste em encontrar o inteiro x , onde $1 \leq x \leq n$, tal que:

$$\beta = \underbrace{\alpha \circ \alpha \circ \dots \circ \alpha}_{x \text{ vezes}} = \alpha^x$$

O Problema do Logaritmo Discreto Generalizado

Os seguintes problemas de logaritmo discreto foram propostos para uso em criptografia:

- 1 O grupo multiplicativo do corpo primo \mathbb{Z}_p ou um subgrupo dele. Por exemplo, o DHKE clássico utiliza este grupo (slides anteriores), mas também a criptografia Elgamal ou o Digital Signature Algorithm (DSA).
- 2 O grupo cíclico formado por uma curva elíptica.
- 3 O grupo multiplicativo de um corpo de Galois $GF(2^m)$ ou um subgrupo dele. Esquemas como o DHKE podem ser realizados com eles.
- 4 Curvas hiperelípticas ou variedades algébricas, que podem ser vistas como generalizações de curvas elípticas.

Observação: Os grupos 1. e 2. são os mais frequentemente utilizados na prática.

- 1 Troca de Chaves de Diffie–Hellman
- 2 O Problema do Logaritmo Discreto
- 3 Segurança da Troca de Chaves Diffie-Hellman
- 4 Exercícios

Ataques contra o Problema do Logaritmo Discreto

- A segurança de muitas primitivas assimétricas baseia-se na dificuldade de calcular o DLP em grupos cíclicos, i.e., calcular x para dados α e β tais que:

$$\beta = \underbrace{\alpha \circ \alpha \circ \dots \circ \alpha}_{x \text{ vezes}} = \alpha^x$$

- Existem os seguintes algoritmos para calcular logaritmos discretos:
 - Algoritmos genéricos: Funcionam em qualquer grupo cíclico
 - Busca por Força Bruta
 - Método Baby-Step-Giant-Step de Shanks
 - Método Rho de Pollard
 - Método de Pohlig-Hellman
 - Algoritmos não genéricos: Funcionam apenas em grupos específicos, em particular em \mathbb{Z}_p
 - Método do Cálculo de Índices
- **Observação:** Curvas elípticas só podem ser atacadas com algoritmos genéricos, que são mais fracos que os algoritmos não genéricos. Portanto, curvas elípticas são seguras com comprimentos de key menores do que o DLP em corpos primos \mathbb{Z}_p .

Ataques contra o Problema do Logaritmo Discreto

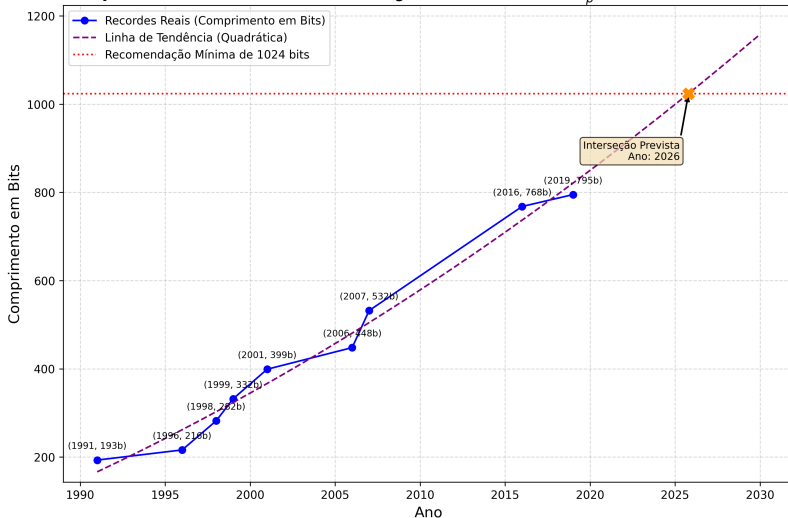
Resumo dos recordes para o cálculo de logaritmos discretos em \mathbb{Z}_p^* :

Dígitos decimais	Comprimento em bits	Data
58	193	1991
68	216	1996
85	282	1998
100	332	1999
120	399	2001
135	448	2006
160	532	2007
232	768	2016
240	795	2019

A fim de prevenir ataques que calculam o DLP, recomenda-se usar primos com um comprimento de pelo menos 2048 bits para esquemas como o Diffie-Hellman em \mathbb{Z}_p^* .

Ataques contra o Problema do Logaritmo Discreto

Evolução dos Recordes de Cálculo do Logaritmo Discreto em \mathbb{Z}_p^* e Tendência Quadrática



Segurança da Troca de Chaves Diffie-Hellman Clássica

- Quais informações Oscar possui?
 - α, p
 - $k_{pubA} = A = \alpha^a \bmod p$
 - $k_{pubB} = B = \alpha^b \bmod p$
- Quais informações Oscar quer obter?
 - $k_{AB} = \alpha^{ba} = \alpha^{ab} \bmod p$
 - Isto é conhecido como Problema de Diffie-Hellman (DHP).
- A única forma conhecida de resolver o DHP é resolver o DLP, i.e.,
 - 1 Calcular $a = \log_{\alpha} A \bmod p$.
 - 2 Calcular $k_{AB} = B^a = \alpha^{ba} \bmod p$.

Conjectura-se que o DHP e o DLP são equivalentes, ou seja, resolver o DHP implica resolver o DLP.

- Para prevenir ataques, ou seja, para prevenir que o DLP possa ser resolvido, escolha $p > 2^{1024}$.

- O protocolo Diffie-Hellman é um método amplamente utilizado para troca de chaves. Ele é baseado em grupos cíclicos.
- O problema do logaritmo discreto é uma das mais importantes funções de mão única na criptografia assimétrica moderna. Muitos algoritmos de chave pública são baseados nele.
- Para o protocolo Diffie-Hellman em \mathbb{Z}_p^* , *o primo p deve ter pelo menos 1024 bits* de comprimento. Isto proporciona uma segurança aproximadamente equivalente a uma cifra simétrica de 80 bits.
- Para uma melhor segurança a longo prazo, um primo de comprimento 2048 bits deve ser escolhido.

- 1 Troca de Chaves de Diffie–Hellman
- 2 O Problema do Logaritmo Discreto
- 3 Segurança da Troca de Chaves Diffie-Hellman
- 4 Exercícios

Exercício 1: Cálculo de Chaves DHKE

Calcule as duas chaves públicas e a chave conjunta k_{AB} para o esquema DHKE com os parâmetros $p = 467$, $\alpha = 2$, e os seguintes pares de chaves privadas (a, b) :

- $a = 3, b = 5$
- $a = 400, b = 134$
- $a = 228, b = 57$

Em todos os casos, realize o cálculo da chave conjunta tanto do ponto de vista de Alice quanto de Bob. Isso servirá como uma verificação dos seus resultados.

Exercício 2: Chaves Privadas no DHKE

No protocolo DHKE, as chaves privadas são escolhidas do conjunto

$$\{2, \dots, p - 2\}$$

Por que os valores 1 e $p - 1$ são excluídos? Descreva a fraqueza desses dois valores.

Explicação: Fraqueza das Chaves Privadas 1 e $p - 1$

A exclusão dos valores 1 e $p - 1$ para chaves privadas no protocolo Diffie-Hellman (DHKE) é crucial para a segurança. Vejamos as fraquezas associadas a cada um:

Caso 1: Chave Privada $a = 1$

- **Chave Pública de Alice (A):** Se Alice escolhe $a = 1$, sua chave pública se torna:

$$A = \alpha^a \pmod{p} = \alpha^1 \pmod{p} = \alpha \pmod{p}$$

- **Chave Conjunta (K_{AB}):** A chave conjunta calculada por Alice seria:

$$K_{AB} = B^a \pmod{p} = B^1 \pmod{p} = B \pmod{p}$$

- **Fraqueza:** A chave conjunta é simplesmente a chave pública de Bob (B). Se um invasor (Oscar) interceptar B (que é transmitido publicamente), ele conhecerá diretamente a chave secreta K_{AB} . Alice não adiciona nenhuma entropia ou segurança à chave.

Explicação: Fraqueza das Chaves Privadas 1 e $p - 1$

Caso 2: Chave Privada $a = p - 1$

- **Contexto (Pequeno Teorema de Fermat):** Se p é um número primo, então para qualquer inteiro α não divisível por p , temos $\alpha^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$.
- **Chave Pública de Alice (A):** Se Alice escolhe $a = p - 1$, sua chave pública se torna:

$$A = \alpha^a \pmod{p} = \alpha^{p-1} \pmod{p} \equiv 1 \pmod{p}$$

- **Chave Conjunta (K_{AB}):** A chave conjunta calculada por Alice seria:

$$K_{AB} = B^a \pmod{p} = B^{p-1} \pmod{p}$$

Considerando que $B = \alpha^b \pmod{p}$ e $B \not\equiv 0 \pmod{p}$, então $B^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$.

$$K_{AB} \equiv 1 \pmod{p}$$

- **Fraqueza:** A chave conjunta resultante é sempre 1. Uma chave secreta de valor 1 é trivial, previsível e não oferece segurança alguma.